

## ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ ХВОСТОХРАНИЛИЩА ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОГРАЖДАЮЩЕЙ ДАМБЫ: 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ

Н.А. Калашник

Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, e-mail: n.kalashnik@ksc.ru

**Аннотация:** Объектом исследования является хвостохранилище обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия – как сложная гидротехническая система, промышленная и экологическая безопасность которой в значительной степени определяется как объемом и состоянием намывных отложений, так и степенью их водонасыщенности. Вода в хвостохранилище должна быть в текущих проектных отметках, с формированием намывных пляжей у ограждающих дамб достаточной длины. Вместе с тем, в силу природных (ливни, паводки) и технических (сбросы промышленных вод) причин степень водонасыщенности хвостохранилища может достигать, а иногда и превышать, максимальное проектное значение. Поэтому целью работы являлось выявление закономерностей влияния степени водонасыщенности хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия на гидрогеомеханическое состояние и фильтрационно-деформационную устойчивость ограждающей дамбы. Метод исследования заключался в построении 3D-модели фрагмента хвостохранилища, на примере одного из горнодобывающих предприятий Кольского региона, и компьютерном моделировании формирующихся фильтрационно-деформационных процессов при различных уровнях воды в емкости хвостохранилища. В результате исследования получены расчетные показатели, характеризующие результирующее гидрогеомеханическое состояние ограждающей дамбы в зависимости от степени заполнения водой емкости хвостохранилища. Предложен подход к формированию научно-технической основы для решения задач по обеспечению промышленной безопасности хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия, водонасыщенность емкости которого находится в сильной зависимости от природных и техногенных влияющих факторов.

**Ключевые слова:** горнодобывающее предприятие, хвостохранилище, заполнение водой емкости, водонасыщенность, ограждающая дамба, фильтрация, гидрогеомеханическое состояние, 3D-моделирование, промышленная безопасность.

**Для цитирования:** Калашник Н. А. Влияние степени водонасыщенности хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия на гидрогеомеханическое состояние ограждающей дамбы: 3D-моделирование // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 5. – С. 144–155. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_5\_0\_144.

---

## Influence of tailings pond water content on hydrogeomechanical condition of embankment at concentrating plant: 3D modeling

N.A. Kalashnik

Mining Institute, Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia, e-mail: n.kalashnik@ksc.ru

---

**Abstract:** Subject of research is a tailings pond at a concentrating plant of a mining enterprise as a complex hydraulic structure with its environmental and industrial safety greatly governed by the volume and condition of tailings, as well as by their water content. Water in tailings ponds should be within design levels, with formation of sufficiently long embankment beaches. In the meanwhile, because of the factors of nature (rainfalls, floods) and technology (industrial effluents), water saturation of tailings ponds can reach and even exceed the maximal design value. For this reason, the aim of this study is to reveal regular influence exerted by the degree of water saturation of a tailings pond at a concentrating plant on hydrogeomechanics, seepage and deformation of an embankment. The research method was 3D modeling of a part of a tailings pond as a case-study of a mining enterprise in the Kola Region, and computer modeling of induced seepage and deformation processes at different values of water in the tailings pond. The research results are the calculated values which characterize the resultant hydrogeomechanical condition of the embankment as function of the water content of the tailings pond. An approach is proposed to constructing a research framework for problem solving on industrial safety of tailings pond at concentrating plants in case that their water content is greatly dependent on natural and induced factors.

**Key words:** mining enterprise, tailings pond, pondage, water content, embankment, seepage, hydrogeomechanical condition, 3D modeling, industrial safety.

**For citation:** Kalashnik N. A. Influence of tailings pond water content on hydrogeomechanical condition of embankment at concentrating plant: 3D modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(5):144-155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_5\_0\_144.

---

### Введение

Хвостохранилище горнодобывающего предприятия представляет собой сложную гидротехническую систему (ГТС), промышленная и экологическая безопасность которой в значительной степени определяется не только состоянием намывных отложений, но и степенью наполнения емкости хвостохранилища водой [1 – 4]. Вода в хвостохранилище должна быть в текущих проектных значениях (прудок-отстойник), с формированием намывных пляжей у ограждающих дамб. Вместе с тем, в силу природных (ливни, паводки) и технических (сбросы промышленных вод) причин на-

полнение водой емкости хвостохранилища может достигать, а иногда и превышать, максимальное проектное значение [5 – 8]. В таких случаях наблюдается сокращение длины намывных пляжей, иногда вплоть до их исчезновения. Отмечены случаи, когда вода достигала подошвы и верхового склона насыпных ограждающих дамб [3, 6, 9].

В этой связи необходимо отметить ряд современных исследований состояния хвостохранилищ горнодобывающих предприятий и фильтрационно-деформационной устойчивости ограждающих их дамб [2, 7 – 9]. В качестве преваляющей задачи при этом является оцен-

ка степени фильтрации воды сквозь ее тело при различных положениях депрессионной поверхности грунтовых вод в ГТС хвостохранилища [10–14]. Результатами исследований подтверждается, что формирующаяся в намывных отложениях и в грунтах насыпных дамб депрессионная поверхность напрямую связана с положением уреза и объемом воды или степенью заполнения емкости хвостохранилища водой.

Вследствие природных (продолжительные дожди, ливни, обильное снеготаяние, паводки, интенсивные стоки с прилегающих горных склонов) и технических (плановые и аварийные сбросы промышленных вод) причин емкость хвостохранилища может быстро заполниться до максимального проектного значения, а в некоторых случаях и превысить его [15]. Это может привести как к разрушению ограждающей дамбы, так и к переливу воды через ее гребень. Поэтому целью работы являлось выявление закономерностей влияния степени водонасыщенности хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия на гидрогеомеханическое состояние и фильтрационно-деформационную устойчивость ограждающей дамбы.

### Методы и подходы

Основные методы и подходы в работе заключались в построении 3D-мо-

дели ГТС хвостохранилища и гидрогеомеханическом моделировании формирующихся в теле ограждающей дамбы фильтрационно-деформационных процессов при различных случаях заполнения емкости хвостохранилища водой [14–18].

Принимая во внимание, что ГТС хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия представляет собой огромную природно-техническую систему, площадью сотни миллионов квадратных метров и протяженностью ограждающих дамб десятки километров, построение ее 3D-модели базировалось на методических подходах к моделированию таких объектов, околнуренных линейными протяженными сооружениями [11, 19, 20]. В случае с ГТС хвостохранилища такими линейными протяженными сооружениями являются ограждающие дамбы. Поэтому для имитирования системы «хвостохранилище — ограждающая дамба» выбран, на примере ГТС хвостохранилища одного из горнодобывающих предприятий Кольского региона, наиболее характерный (типовой) фрагмент, для которого была создана компьютерная 3D-модель (рис. 1).

Для выполнения исследований разработан 3D-модель фрагмента ГТС хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия, геометрические, инженерно-геологические

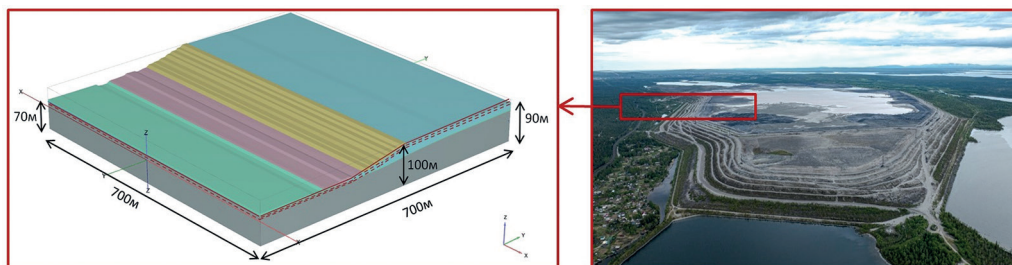


Рис. 1. Методический подход к построению 3D-модели наиболее характерного фрагмента ГТС хвостохранилища

Fig. 1. Methodical Approach to Construction of 3D Model of the Most Typical Fragment of Tailing Pond HTS

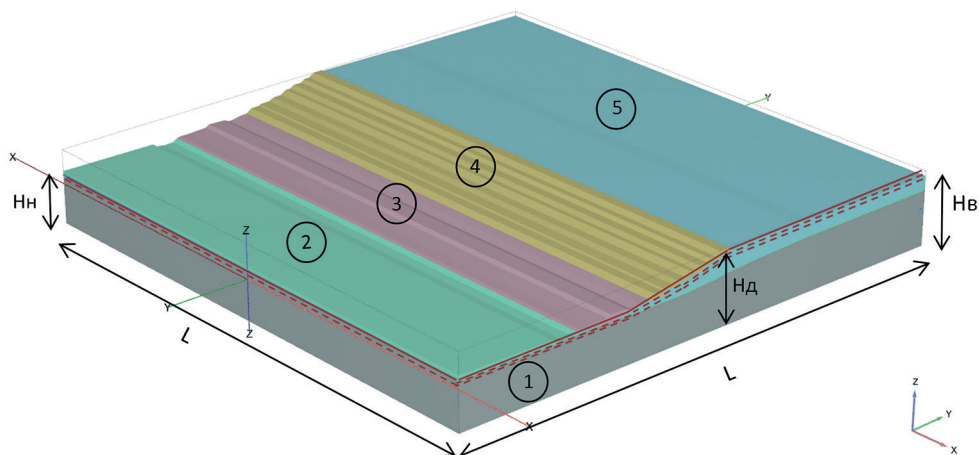


Рис. 2. 3D-модель фрагмента ГТС хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия (цветами и арабскими цифрами обозначены грунты согласно таблице)

Fig. 2. 3D model of the fragment of the HTS of the tailings dump of the concentration plant of the mining enterprise (colors and Arabic numerals indicate soils according to the table)

и гидрологические условия которой показаны на рис. 2. Отличительной особенностью модели является возможность реализации совместных фильтрационно-деформационных расчетов, в которых учитываются гидростатические (степень водонасыщения грунтов, разность напоров на верховом и низовом откосах дамбы), гидродинамические (образование водотоков, скорость и давление потока) и геомеханические (деформации и смещения грунтов под действием силы тяжести, а также вследствие гидростатического и динамического давления воды) условия и нагрузки [11, 15].

Построение 3D-модели выполнялось в следующей последовательности:

- определение геометрии выбранного фрагмента ГТС хвостохранилища;
- построение дифференцированных моделей инженерно-геологического строения основания, намывных хвостовых отложений и насыпных грунтов дамбы;
- задание свойств грунтов и пород (параметры деформационных, прочностных и фильтрационных свойств) (таблица);
- задание граничных условий и нагрузок от веса грунтов и воды;

- задание дифференцированной для различных слоев грунтов конечно-элементной сетки;
- проведение тестовых расчетов;
- обработка полученных тестовых результатов с возможностью сравнительного анализа с натурными данными;
- калибровка модели по данным натурных наблюдений;
- подтверждение адекватности созданной модели натурному объекту.

Для калибровки разработанной 3D-модели использованы данные рекогносцировочного и визуального обследования, геологические данные, результаты инженерно-геологических, гидрологических и геофизических изысканий, выполненных на хвостохранилище обогатительной фабрики одного из горнодобывающих предприятий Кольского региона [19]. Параметры физико-механических характеристик грунтов, используемые в модели и для моделирования, приведены в таблице.

При моделировании были использованы следующие модели поведения грунтов под нагрузкой: для пород основания — MohrCoulomb, для намывных

**Параметры физико-механических характеристик грунтов,  
используемые для расчетов**

**Parameters of physical and mechanical characteristics of soils used for calculations**

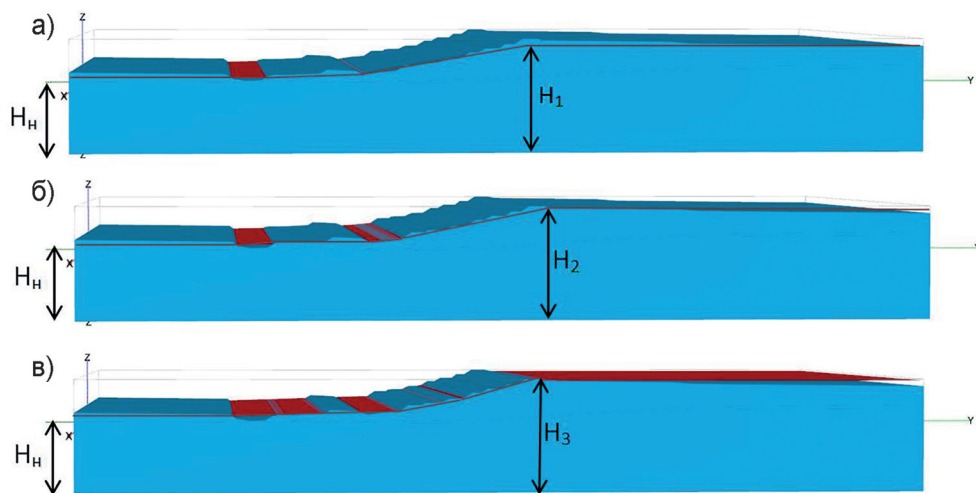
Параметры			Значения				
Название	Обозначение	Единица измерения	Геологическое основание	Морена	Пионерная дамба	Насыпные ярусы	Намывные отложения хвостохранилища
			1	2	3	4	5
Удельный вес сухого грунта	$\gamma_{unsat}$	кН/м <sup>3</sup>	23,0	20,2	17	19,8	16,9
Удельный вес влажного грунта	$\gamma_{sat}$	кН/м <sup>3</sup>	23,5	20,5	21	22,1	20,6
Коэффициент фильтрации	$K_{\phi}$	м/день	0,01	0,001	0,1	1,0	0,1
Модуль деформации	$E$	кН/м <sup>2</sup>	500 000	17 000	10 000	40 000	8000
Коэффициент Пуассона	$\nu$	—	0,25	0,33	0,35	0,3	0,32
Сцепление	$c_{ref}$	кН/м <sup>2</sup>	8	7	2	4,0	0,1
Угол внутреннего трения	$\varphi$	град.	60	29	28	34	33
Угол дилатансии	$\psi$	град.	25	—	—	—	—

отложений — HardeningSoilSmall, для остальных грунтов — HardeningSoil. Тип дренирования для всех грунтов и пород задавался Drained [21].

Компьютерное гидрогеомеханическое 3D-моделирование выполнено для

трех нормируемых расчетных случаев для низового откоса ограждающей дамбы (рис. 3) согласно СП 39.13330.2012. [22]:

- первый: в верхнем бьефе — нормальный подпорный уровень ( $H_1$ ), меж-



Красным цветом показана поверхность воды как в емкости хвостохранилища, так и на низовом откосе ограждающей дамбы

Рис. 3. Моделируемые расчетные случаи водонасыщенности ГТС хвостохранилища: первый (а); второй (б); третий (особый) (в)

Fig. 3. Modeled design cases of water saturation of tailing dump HTS: first (a); second (b); third (special) (v)



ду урезом и дамбой — намывной пляж, в теле дамбы — установившаяся фильтрация;

- второй: в верхнем бьефе — высокий подпорный уровень ( $H_2$ ), между урезом и дамбой практически нет намывного пляжа, в теле дамбы — повышенная фильтрация воды, с возможным выходом на низовом откосе;

- третий (особый): в верхнем бьефе — форсированный подпорный уровень воды ( $H_3$ ), урез на верховом откосе дамбы, в теле дамбы — высокая фильтрация воды с интенсивным выходом на низовом откосе.

Для всех расчетных случаев уровень грунтовых вод принят одинаковым  $H_n$ .

Следует отметить, что для первого расчетного случая (рис. 3, а) вода на дневной поверхности находится в оконтуривающей хвостохранилище канаве, что соответствует фактическому состоянию. Для второго (рис. 3, б) и третьего (рис. 3, в) случаев происходит дополни-

тельное дренирование фильтрующейся воды на ярусы низового откоса ограждающей дамбы.

Для разработанной 3D-модели использовалось два режима разбивки сетки конечных элементов: Fine (Мелкая) и Veryfine (Очень мелкая). Общее количество элементов составило 176 141, количество узлов 25 277; средний размер элементов составил 10,13 м, при максимальном 57,03 м и минимальном 0,29 м на различных участках модели.

### Результаты

В результате компьютерного моделирования с использованием программного комплекса PLAXIS 3D получены расчетные значения, характеризующие гидрогеомеханическое состояние исследуемого хвостохранилища для рассматриваемых сочетаний нагрузок и условий работы. В частности, на рис. 4 приведены картины степени фильтрации (Saturation) (слева) и общих перемещений

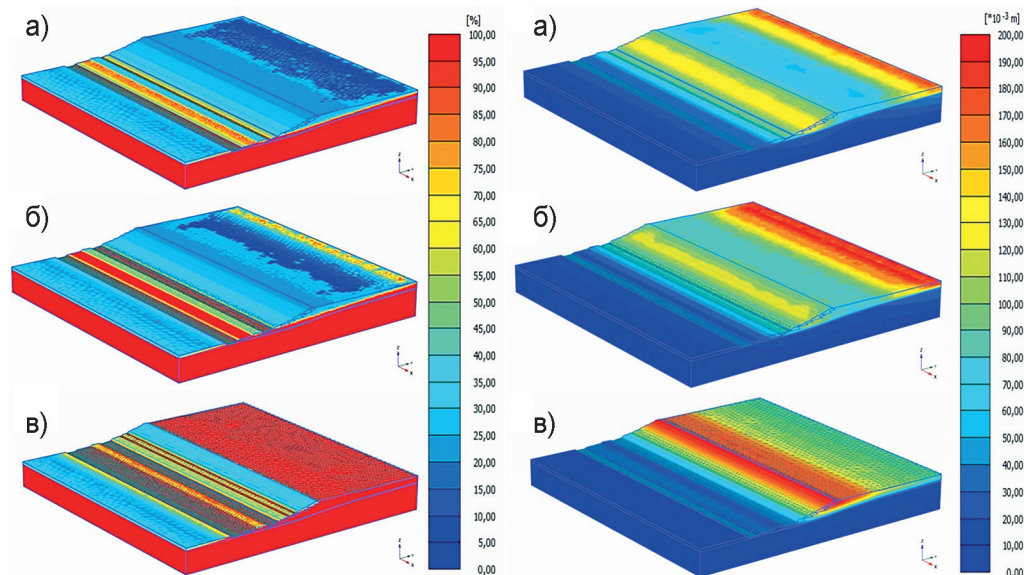


Рис. 4. Картины распределения степени фильтрации (слева) и общих перемещений (справа) грунтов для моделируемых расчетных случаев наполнения емкости хвостохранилища водой: первый (а); второй (б); третий (особый) (в)

Fig. 4. Pictures of the distribution of the degree of filtration (left) and general movements (right) of soils for simulated calculated cases of filling the tailing pond with water: first (a); second (b); third (special) (v)

(справа) грунтов для моделируемых расчетных случаев.

По результатам выполненных расчетов для первого случая определено, что усредненная скорость фильтрации воды сквозь тело ограждающей дамбы составит 8,9 м/сут, для второго – 21,8 м/сут, для третьего (особого) – 62 м/сут.

Картины распределения общих перемещений ( $U_{\text{общ}}$ ) грунтов для моделируемых расчетных случаев наполнения водой емкости хвостохранилища приведены на рис. 4.

Анализ картин распределения общих перемещений ( $U_{\text{общ}}$ ) грунтов позволяет прийти к выводам, что для первого (рис. 4, а) второго (рис. 4, б) расчетных случаев перемещения грунтов незначительны. Для третьего расчетного случая, в котором емкость хвостохранилища моделируется заполненной водой полностью, грунты гребня и верхних ярусов низового откоса ограждающей дамбы подвержены значительным смещениям (соответствуют красному цвету на рис. 4, в).

По результатам выполненных расчетов для первого случая определено, что усредненные значения общих перемеще-

ний ( $U_{\text{общ}}$ ) составляют 0,045 м, для второго – 0,065 м, для третьего – возрастают кратно и могут достигать 0,20 м.

По результатам моделирования определены расчетные значения скорости фильтрации воды сквозь тело ограждающей дамбы. Зависимость значений скорости фильтрации воды от положения водной поверхности в емкости хвостохранилища для расчетных случаев приведена на рис. 5. Отметки положения водной поверхности для каждого расчетного случая приняты в соответствии с геометрическими размерами, показанными на рис. 2.

Как следует из рис. 5, повышение водной поверхности в хвостохранилище от фактического состояния (первый расчетный случай) до предельного по проекту (второй расчетный случай) приведет к увеличению значений скорости фильтрации практически в 3 раза (от 8 до 23 м/сут). Максимальное положение поверхности воды в емкости хвостохранилища (третий расчетный случай) приведет к резкому возрастанию значений скорости фильтрации (почти в 8 раз) по сравнению с фактическим, что обусловит существенное ухудшение гидро-

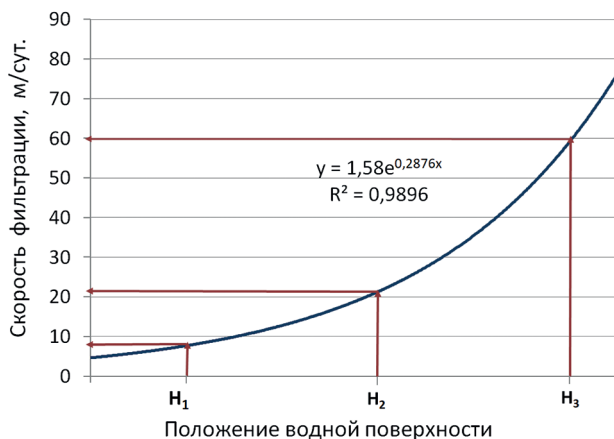


Рис. 5. Зависимость скорости фильтрации воды сквозь тело ограждающей дамбы от положения поверхности воды в емкости хвостохранилища для расчетных случаев H1, H2 и H3

Fig. 5. Dependence of water filtration rate through the dam body on the water surface position in the tailings storage tank for design cases H1, H2 and H3

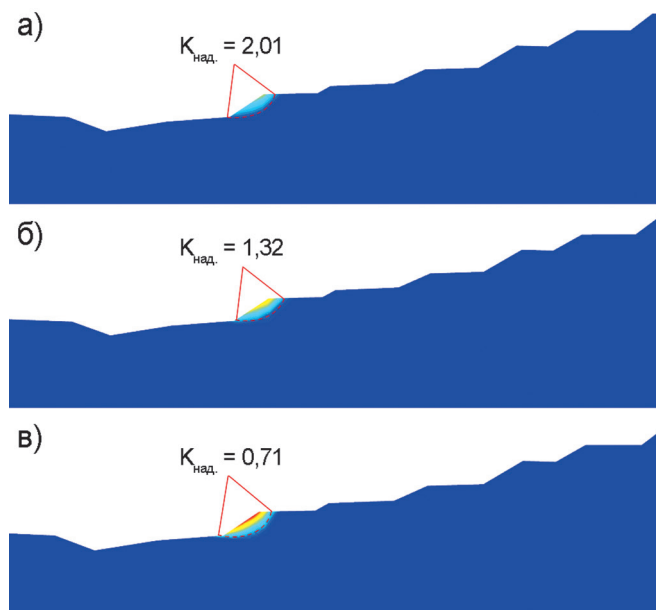


Рис. 6. Коэффициент надежности низового откоса ограждающей дамбы для расчетных случаев: первый (а), второй (б), третий (особый) (в)

Fig. 6. Safety factor of the lower slope of the enclosing dam for design cases: first (a), second (b), third (special) (v)

геомеханического состояния грунтов дамбы.

Согласно СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов, для различных сочетаний нагрузок, условий работы, надежности по ответственности сооружения должен определяться коэффициент надежности ( $K_{над.}$ ).

В данной работе выполнено определение значений коэффициента надежности низового откоса ограждающей дамбы для моделируемых расчетных случаев, как интегрированного показателя геомеханических и гидравлических нагрузок и условий работы ГТС хвостохранилища (рис. 6).

Как следует из рис. 6, повышение поверхности воды (водонасыщенности) в емкости хвостохранилища от фактического (первый расчетный случай) к повышенному (второй расчетный случай) приводит к снижению  $K_{над.}$  от 2,01 до 1,32. Максимальный подъем поверхности воды (третий (особый) расчетный

случай) приведет к крайне низкому значению  $K_{над.} = 0,71$ .

### Обсуждение

Выполненными исследованиями установлено, что положение поверхности воды в емкости хвостохранилища оказывает определяющее значение на гидрогеомеханическое состояние ограждающей дамбы.

При подъеме уровня воды до повышенного и, далее, до максимального, скорость фильтрации воды сквозь грунты дамбы возрастает от 8 до более 60 м/сут, по экспоненциальной зависимости  $y = 1,58e^{0,2876x}$  с высокой степенью достоверности ( $R^2 = 0,9896$ ).

Это предоставляет научно-техническую основу для получения значений скорости фильтрующейся воды сквозь тело ограждающей дамбы, как по построенному графику, так и посредством расчетов по полученной аналитической зависимости.



Исходной для этого будет положение водной поверхности в емкости хвостохранилища относительно высоты гребня ограждающей дамбы.

Следует заметить, что скорость фильтрации воды сквозь тело ограждающей дамбы в значительной степени определяет состояние и перемещение ее грунтов и, тем самым, их фильтрационно-деформационную устойчивость. Интегрированный показатель условий работы и функциональности ограждающей дамбы, представленный в работе в виде коэффициента надежности  $K_{над}$ , резко снижается от 2,01 (фактическое состояние) до 1,32 (повышенный уровень воды) и далее — до крайне низкого значения  $K_{над} = 0,71$  (максимальный уровень воды). То есть в случае максимального заполнения водой емкости хвостохранилища за счет внеплановых сбросов промышленных вод, ливневых осадков и паводков произойдет резкое возрастание скорости фильтрации сквозь тело ограждающей дамбы и, как следствие, изменение состояния, перемещение и разуплотнение слагающих дамбу грунтов. Это дает основания прогнозировать формирование гидрогеомеханического состояния, при котором ограждающая дамба может утратить фильтрационно-деформационную устойчивость.

### **Заключение**

На примере хвостохранилища обогатительной фабрики одного из горнодобывающих предприятий Кольского региона выполнено компьютерное 3D-моделирование влияния степени водонасыщенности (положения поверхности воды в емкости хвостохранилища) на гидрогеомеханическое состояние ограждающей дамбы.

Создана 3D-модель фрагмента ГТС хвостохранилища, имитирующая три основных случая положения водной поверхности в емкости хвостохранилища:

фактическое состояние, повышенное (без намывного пляжа) и максимальное заполнение емкости водой.

Выполненными исследованиями установлено, что положение поверхности воды в емкости хвостохранилища оказывает определяющее значение на гидрогеомеханическое состояние ограждающей дамбы.

При подъеме уровня воды до повышенного и, далее, до максимального, скорость фильтрации воды сквозь грунты дамбы возрастает от 8 до более 60 м/сут, то есть практически в 3 и в 8 раз, соответственно.

Коэффициент надежности  $K_{над}$  низкого откоса, отражающий учет действующих нагрузок и условия работы ограждающей дамбы, резко снижается от 2,01 (фактическое состояние) до 1,32 (повышенный уровень воды) и до крайне низкого значения  $K_{над} = 0,71$  (максимальный уровень воды). То есть внеплановые сбросы промышленных вод, ливневые осадки, а также паводки при обильном снеготаянии, которые могут привести к максимальному заполнению водой емкости хвостохранилища, приведут к резкому ухудшению гидрогеомеханического состояния ограждающей дамбы.

Вследствие этого изменится состояние, произойдут негативные перемещения и разуплотнение слагающих дамбу грунтов и ограждающая дамба может утратить фильтрационно-деформационную устойчивость.

Результаты выполненных исследований предоставляют научно-техническую основу для решения задач по обеспечению промышленной безопасности хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия, водонасыщенность емкости которого находится в сильной зависимости от природных и техногенных влияющих факторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калашник А. И. Комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ горнопромышленных предприятий Кольского региона // Горный журнал. — 2020. — № 9. — С. 101–106. DOI: 10.37490/S221979310025285-6.
2. Tao M., Zhang X., Wang S., Cao W., Jiang Y. Life cycle assessment on lead – zinc ore mining and beneficiation in China // Journal of Cleaner Production. 2019, vol. 237, article 117833. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117833.
3. Абдыгазиев К. К., Чукин Р. Б., Самаган уулу Б. Исследование развития гидродинамической аварии, связанной с распространением потока неконсолидированной жидкости при переливе через гребень дамбы хвостохранилища рудника Кумтор // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. — 2022. — Т. 22. — № 12. — С. 93–99. DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-93-99.
4. Fortuna J., Waterhouse J., Chapman P., Gowan M. Applying practical hydrogeology to tailings storage facility design and management // Mine Water and the Environment. 2021, vol. 40, pp. 50–62. DOI: 10.1007/s10230-020-00739-x.
5. Zongjie L., Junrui C., Zengguang X., Yuan Q., Jing C. A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history // Advances in Civil Engineering. 2019, article 4159306. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/4159306/> (дата обращения: 22.03.2022).
6. Owen J. R., Kemp D., Lèbre É., Svobodova K., Pérez Murillo G. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2020, vol. 42, article 101361. DOI: 10.1016/j.ijdr.2019.101361.
7. Щипцов В. В., Тишков С. В., Волков А. Д. Современное состояние и перспективы развития хвостохранилища моногорода арктической зоны (на примере АО «Карельский окатыш») // Горный журнал. — 2023. — № 2. — С. 68–73. DOI: 10.17580/gzh.2023.02.11.
8. Song X., Pettersen J. B., Pedersen K. B., Røberg S. Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine. A case study in Northern Norway // Journal of Cleaner Production. 2017, vol. 164, pp. 892–904. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.021.
9. Tost M., Hitch M., Chandurkar V., Moser P., Feiel S. The state of environmental sustainability considerations in mining // Journal of Cleaner Production. 2018, vol. 182, pp. 969–977. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.051.
10. Muniruzzaman M., Karlsson T., Ahmadi N., Role M. Multiphase and multicomponent simulation of acid mine drainage in unsaturated mine waste: Modeling approach, benchmarks and application examples // Applied Geochemistry. 2020, vol. 120, article 104677. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104677.
11. Калашник Н. А. Оценка фильтрационно-деформационных процессов в ограждающей дамбе хвостохранилища на основе 3d-моделирования // Горная промышленность. — 2024. — № 1. — С. 100–104. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-1-100-104.
12. Kalashnik N. A. Influence of water filtration rate on the functionality of the mining tailings dam // Journal of Physics Conference Series. 2022, vol. 2388, no. 1, article 012149. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012149.
13. Храпов С. С. Численное моделирование гидродинамических аварий: размыв дамб и затопление территорий // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. — 2023. — Т. 10. — № 2. — С. 357–373. DOI: 10.21638/spbu01.2023.215.
14. Храпов С. С. Численное моделирование самосогласованной динамики поверхностных и грунтовых вод // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2021. — Т. 24. — № 3. — С. 45–62. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2021.3.5.
15. Шарипов Д. Ш. Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ // Науки о Земле и недропользование. — 2021. — № 44(1). — С. 63–72. DOI: 10.21285/2686-9993-2021-44-1-63-72.
16. Lolaev A., Oganessian A., Badoev A. S., Oganessian E. Tailing dams formation algorithm // Arabian Journal of Geosciences. 2020, vol. 13, no. 19, article 974. DOI: 10.1007/s12517-020-05990-8.
17. Белослудцева Ю. О., Котлов О. Н. Прогноз температурного режима гидротехнических сооружений с учетом фильтрационного потока // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. — 2024. — Т. 311. — С. 65–74.

18. Muller S., Lassin A., Lai F., Thiéry D., Guignot S. Modelling releases from tailings in life cycle assessments of the mining sector: From generic models to reactive transport modeling // *Minerals Engineering*. 2022, vol. 180, no. 6, article 107481. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107481.

19. Сольский С. В., Гладштейн О. И., Зеленский И. Г. Современные решения применения геосинтетических материалов на грунтовых сооружениях // *Гидротехника*. — 2023. — № 4 (73). — С. 62–67. DOI: 10.55326/22278400\_2023\_4\_62.

20. Шерхов А. X., Гергокова З. Ж. Оценка актуального состояния некоторых компонентов комплекса гидротехнических сооружений хвостохранилища Тырныаузского горно-обогатительного комбината // *Природообустройство*. — 2022. — № 4. — С. 100–106. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-100-106.

21. Obrzud R. F., Truty A. The hardening soil model — a practical guidebook. Revised 21.10.2018. 2018, 216 p. URL: [http://www.zsoil.com/zsoil\\_manual\\_2018/Rep-HS-model.pdf](http://www.zsoil.com/zsoil_manual_2018/Rep-HS-model.pdf) (дата обращения: 11.09.2023).

22. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. — М.: Минрегион России, 2012. — С. 34. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095521?ysclid=lxohf3z2jy963752248>. **ПЛАБ**

## REFERENCES

1. Kalashnik A. I. Integrated research and monitoring of mine tailings on the Kola Peninsula. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 101–106. [In Russ]. DOI: 10.37490/S221979310025285-6.

2. Tao M., Zhang X., Wang S., Cao W., Jiang Y. Life cycle assessment on lead–zinc ore mining and beneficiation in China. *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 237, article 117833. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117833.

3. Abygaziev K. K., Chukin R. B., Samagan U. B. Investigation of the development of a hydrodynamic accident associated with the spread of unconsolidated liquid flow during overflow over the crest of the Kuntor mine tailings dam. *Herald of KRSU*. 2022, vol. 22, no. 12, pp. 93–99. [In Russ]. DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-93-99.

4. Fortuna J., Waterhouse J., Chapman P., Gowan M. Applying practical hydrogeology to tailings storage facility design and management. *Mine Water and the Environment*. 2021, vol. 40, pp. 50–62. DOI: 10.1007/s10230-020-00739-x.

5. Zongjie L., Junrui C., Zengguang X., Yuan Q., Jing C. A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history. *Advances in Civil Engineering*. 2019, article 4159306, available at: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/4159306/> (accessed 22.03.2022).

6. Owen J. R., Kemp D., Lèbre É., Svobodova K., Pérez Murillo G. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020, vol. 42, article 101361. DOI: 10.1016/j.ijdr.2019.101361.

7. Shchiptsov V. V., Tishkov S. V., Volkov A. D. The current state and development prospects of the tailing dump of the monotown of the Arctic zone (on the example of Karelsky Okatysh JSC). *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 2, pp. 68–73. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.02.11.

8. Song X., Pettersen J. B., Pedersen K. B., Røberg S. Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine. A case study in Northern Norway. *Journal of Cleaner Production*. 2017, vol. 164, pp. 892–904. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.021.

9. Tost M., Hitch M., Chandurkar V., Moser P., Feiel S. The state of environmental sustainability considerations in mining. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 182, pp. 969–977. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.051.

10. Muniruzzaman M., Karlsson T., Ahmadi N., Role M. Multiphase and multicomponent simulation of acid mine drainage in unsaturated mine waste: Modeling approach, benchmarks and application examples. *Applied Geochemistry*. 2020, vol. 120, article 104677. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104677.

11. Kalashnik N. A. Assessment of filtration and deformation processes in the tailing dam based on 3d-modeling. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 1, pp. 100–104. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-1-100-104.

12. Kalashnik N. A. Influence of water filtration rate on the functionality of the mining tailings dam. *Journal of Physics Conference Series*. 2022, vol. 2388, no. 1, article 012149. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012149.

13. Khrapov S. S. Numerical modeling of hydrodynamic accidents: Erosion of dams and flooding of territories. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. 2023, vol. 10, no. 2, pp. 357 – 373. [In Russ]. DOI: 10.21638/spbu01.2023.215.

14. Khrapov S. S. Numerical modeling of self-consistent dynamics of shallow and ground waters. *Mathematical physics and computer simulation*. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 45 – 62. [In Russ]. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2021.3.5.

15. Sharipov D. Sh. Hydrodynamic and hydrostatic forces as factors affecting the stability of tailings. *Earth science and subsoil use*. 2021, no. 44(1), pp. 63 – 72. [In Russ]. DOI: 10.21285/2686-9993-2021-44-1-63-72.

16. Lolaev A., Oganessian A., Badoev A. S., Oganessian E. Tailing dams formation algorithm. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020, vol. 13, no. 19, article 974. DOI: 10.1007/s12517-020-05990-8.

17. Belosludtseva Yu. O., Kotlov O. N. Temperature regime forecast of hydraulic structures taking into account filtration flow. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva*. 2024, vol. 311, pp. 65 – 74. [In Russ].

18. Muller S., Lassin A., Lai F., Thiéry D., Guignot S. Modelling releases from tailings in life cycle assessments of the mining sector: From generic models to reactive transport modeling. *Minerals Engineering*. 2022, vol. 180, no. 6, article 107481. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107481.

19. Solsky S. V., Gladshstein O. I., Zelensky I. G. Cutting-edge solutions for application of geosynthetic materials on ground structures. *The Hydrotechnika*. 2023, no. 4 (73), pp. 62 – 67. [In Russ]. DOI: 10.55326/22278400\_2023\_4\_62.

20. Sherkhov A. Kh., Gergokova Z. Zh. Assessment of the current state of some components of the complex of hydraulic structures of the tailing dump of the Tyrnyauz mining and processing plant. *Prirodobuzrojstvo*. 2022, no. 4, pp. 100 – 106. [In Russ]. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-100-106.

21. Obrzud R. F., Truty A. *The hardening soil model – a practical guidebook*. Revised 21.10.2018. 2018, 216 p., available at: [http://www.zsoil.com/zsoil\\_manual\\_2018/Rep-HS-model.pdf](http://www.zsoil.com/zsoil_manual_2018/Rep-HS-model.pdf) (accessed 11.09.2023).

22. *SP 39.13330.2012. Plotiny iz gruntovykh materialov* [SP 39.13330.2012. Dams made of ground materials]. Moscow, 2012, pp. 34. [In Russ], available at: [https:// docs.cntd.ru/document/1200095521?ysclid=lxohf3z2jy963752248](https://docs.cntd.ru/document/1200095521?ysclid=lxohf3z2jy963752248).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Калашник Надежда Анатольевна — научный сотрудник,  
Горный институт КНЦ РАН, e-mail: n.kalashnik@ksc.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-7651-6562.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

N.A. Kalashnik, Researcher, Mining Institute,  
Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,  
184209, Apatity, Russia, e-mail: n.kalashnik@ksc.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-7651-6562.

Получена редакцией 27.06.2024; получена после рецензии 18.07.2024; принята к печати 10.04.2025.  
Received by the editors 27.06.2024; received after the review 18.07.2024; accepted for printing 10.04.2025.

